УДК 621.3

А.Я. Кулик, Я.А. Кулик
Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

Розроблена математична модель системи передавання як автоматизованої системи управління процесом обміну інформацією у вигляді системи різницевих рівнянь з використанням матриць імовірнісних переходів, які визначають помилки приймання даних, що дозволяє використовувати класичні методи аналізу і синтезу автоматизованих систем управління.

Построена математическая модель системы передачи как автоматизированной системы управления процессом обмена информацией в виде системы разностных уравнений с использованием матриц вероятностных переходов, которые определяют ошибки приема данных, что позволяет использовать классические методы анализа и синтеза автоматизированных систем управления.

The mathematical model of transmission system as an computer-based system of control of process of information interchange in the form of difference equation system using matrixes of probability transitions which define errors of reception of the data that allows to use classical methods of the analysis and synthesis of the automated control systems is constructed.

Ключові слова: автоматизована система, обмін інформацією, матриця, канал зв'язку.

Вступ. Питання управління та побудови алгоритмів оптимізації в різних галузях становлять актуальну проблему, тому постійно розглядаються в наукових роботах [1; 2]. Останнім часом з'явилися публікації, які присвячені аналізу можливості використання теорії автоматичного управління для дослідження телекомунікаційних систем [3]. Ряд робіт присвячений розгляду цих питань для телефонних [4], комп'ютерних [5] та радіомереж [6; 7].

Постановка задачі. Фактично основну задачу можна сформулювати як управління процесом передавання інформації каналом зв'язку із вибором параметрів сигналів (потужності, тривалості, структури тощо) з урахуванням впливу завад на процес передавання. Виходячи з цього, для досягнення мети ефективного управління необхідно оцінити відгук на цю дію. Для розв'язання поставленої задачі, систему, в узагальненому вигляді, можна представити, як це подано на рис. 1.

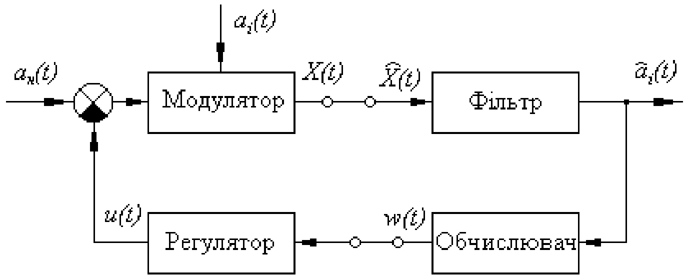


Рис. 1. Узагальнена структура системи передавання інформації

Метод розв'язування. На приймальній частині фільтр виділяє інформаційний сигнал $\hat{a}_i(t)$ і за допомогою обчислювача формує сигнал розузгодження $w(t)$, який, у свою чергу, перетворюється на сигнал управління $u(t)$. Виходячи з цього, задача оптимального управління зводиться до того, щоб сформувати сигнали, які змушували б систему працювати необхідним чином, реагуючи на оцінку якості у відповідності з вибраним критерієм. Задача управління зводиться до оцінки відгуку системи на першому етапі і побудови алгоритму управління з використанням отриманих оцінок – на другому. Такий розподіл задач чітко встановлює пріоритет і показує, що перш ніж розраховувати вплив управління на систему, потрібно оцінити її поведінку. Для цього доцільно використати метод змінних стану.

Оскільки система є дискретною, то її стан визначається лише в дискретні моменти часу, тобто її можна описати системою лінійних рівнянь першого порядку

$$\bar{x}(k+1) = \mathbf{A}(k+1,k)\cdot\bar{x}(k) + \mathbf{\Gamma}(k+1,k)\cdot\overline{w}(k) + \Psi(k+1,k)\cdot\bar{u}(k)\,, \qquad (1)$$

$$\bar{z}(k+1) = \mathbf{H}(k+1)\cdot\bar{x}(k+1) + \bar{v}(k+1)\,, \qquad (2)$$

де $\bar{x}$ – вектор стану; $\bar{w}$ – вектор збурення; $\bar{u}$ – вектор управління; $\bar{z}$ – вектор вимірювання; $\bar{v}$ – вектор похибки вимірювання; A – перехідна матриця стану; Г – перехідна матриця збурення; Ψ – перехідна матриця управління; H – матриця вимірювання.

З урахуванням рис. 1 легко адаптувати вказані величини до реальних умов. Стан динамічної системи являє собою випадковий процес $x(k)$ з дискретним часом $k = 0, 1, \ldots$ З урахуванням поставлених задач оцінка полягає у визначенні параметра $x(k)$ у момент часу k, використовуючи отримані послідовності результатів вимірювань $z(1), z(2), \ldots, z(j)$. Якщо оцінку значення $x(k)$ позначити через $x(k / j)$, то її можна визначити як вектор-функцію вимірювання $x(k/j) = \varphi_k\left(z(1),\ldots,z(j)\right)$. Зручно розглядати похибку оцінки, яка визначається співвідношенням $\tilde{x}(k/j) = x(k) - x(k/j)$. Якщо оцінка неправильна ($\tilde{x}(k/j) \neq 0$), установлюється штраф, який визначає функцію втрат $L\left(\tilde{x}(k/j)\right)$. Якщо критерієм якості оцінки J є середнє значення L, тобто $J\left(\tilde{x}(k/j)\right) = E\left\{L\left(\tilde{x}(k/j)\right)\right\}$, то оцінка $\tilde{x}(k/j)$ буде оптимальною, якщо вона мінімізує $J\left(\tilde{x}(k/j)\right)$.

Для двійкових систем помилки накладаються на сигнал, що передається, таким чином, що взаємодія векторів повідомлення і помилки описується за допомогою операції додавання за модулем 2.

Для вирішення задачі управління станом $\bar{x}$ системи вигляду (2) на певному кінцевому інтервалі часу]0, N] необхідно сформувати послідовність сигналів управління $u(k)$, яка мінімізувала б параметр критерію якості. За цей параметр доцільно прийняти математичне сподівання квадрату змінних стану і управління на фіксованому інтервалі часу [8; 9]

$$J_N = E\left(\sum_{k=1}^{N}\left(\bar{x}'(k)\cdot\mathbf{A}(k)\cdot\bar{x}(k) - \bar{u}'(k-1)\cdot\mathbf{B}(k-1)\cdot\bar{u}(k-1)\right)\right) \to \min . \qquad (3)$$

Для стохастичних систем необхідно розраховувати математичне сподівання E. Параметр J_N інтерпретують як критерій якості вигляду «помилка системи плюс вплив управління». Перша складова передбачає, що бажаний стан системи нульовий, тобто при збільшенні впливу змінних стану x на параметр J_N збільшується відхилення від нуля, а друга – характеризує інтенсивність управління. Таким чином вираз (3) являє собою баланс між похибкою системи та впливом управління. Відносна вага цих двох доданків визначається вибором матриць A(k) та B(k – 1).

Дані про стан системи мають вигляд послідовності результатів вимірювань $z(1)$, $z(2)$, …, $z(N - 1)$ та математичного сподівання $E\left(x(0)\right)$ початкового стану $x(0)$. Виходячи з цього, вектор управління в кожний момент часу k можна визначити як вектор-функцію

$$\bar{u}(k) = \mu_k\left(\bar{z}(1),\ldots,\bar{z}(k), E\left(x(0)\right)\right). \qquad (4)$$

Задачі синтезу оптимальних алгоритмів управління таким класом систем достатньо докладно розглянуті в [9; 10]. Але їх суттєвим недоліком є те, що для реалізації потрібна повна інформація про всі властивості. Синтез алгоритмів управління в умовах відсутності частини інформації про статистичні властивості параметрів, які впливають на функціонування системи, розглядаються в [10]. Тут особлива увага приділяється байєсовським принципам управління в замкнених стохастичних та адаптивних системах, де результатом є визначення комбінованих стратегій управління динамічною системою. Виходячи з вищевикладеного, виникає необхідність вирішення задачі побудови оптимальних алгоритмів управління параметрами цифрової системи зв'язку. При цьому необхідно враховувати обмеження, які накладають умови функціонування системи та принципи взаємодії об'єктів обміну інформацією. Це необхідно здійснювати, використовуючи сформульований критерій якості, який описується виразом (3).

Перевагою методу змінних стану є можливість побудови рекурентних алгоритмів оцінювання та управління, що дозволяє врахувати нестаціонарність каналу зв'язку і забезпечити необхідне корегування роботи алгоритму. Математична модель комп'ютерної системи передавання інформації у вигляді системи різницевих рівнянь має вигляд

$$\overline{X}_{k+1}(g) = \mathbf{A}(k+1,k)\cdot\overline{X}_k(g), \qquad (5)$$

$$\bar{y}_{k+1}(g) = \bar{x}_{\Sigma.k+1} \oplus \mathbf{B}(k+1,k)\cdot\bar{\xi}_k(g), \qquad (6)$$

де $\overline{x_\Sigma}(g)$ – вектор повідомлення; $\overline{y}(g)$ – вектор спостереження; $\bar{\xi}(g)$ – вектор адитивної похибки; $\mathbf{A}(k+1, k)$ – перехідна матриця джерела повідомлення; $\mathbf{B}(k+1, k)$ – перехідна матриця джерела помилок каналу зв'язку.

При цьому для кожного моменту часу $k = 0, 1, \ldots, N$ повинні бути відомі щільності розподілу імовірностей векторів повідомлення і помилки (відповідно $p_{k+1}\left(\overline{x_\Sigma}(g)\right) = \mathbf{\Pi}_{\mathbf{A}}^T \cdot p_k\left(\overline{x_\Sigma}(g)\right)$ та $p_{k+1}\left(\bar{\xi}(g)\right) = \mathbf{\Pi}_{\mathbf{B}}^T \cdot p_k\left(\bar{\xi}(g)\right)$, де $\mathbf{\Pi}_\mathbf{A}$ та $\mathbf{\Pi}_\mathbf{B}$ – матриці перехідних імовірностей векторів повідомлень та похибок). Оскільки допустимі комбінації векторів утворюють групу над полем Галуа $GF(2)$ розмірністю n, то поелементне додавання векторів повідомлення та похибки, як це показано вище, здійснюється за модулем два.

Матриця перехідних імовірностей $\mathbf{A}(k+1,\ k)$ визначається складом використовуваного кодового алфавіту. З кожним кроком k вигляд матриць **A** і **B** змінюється відповідно до матриць перехідних імовірностей $\mathbf{\Pi_A}$ та $\mathbf{\Pi_B}$. Таким чином, рівняння (5) та (6) дозволяють описати систему передавання з урахуванням нестаціонарності каналу зв'язку.

Комп'ютерна система управління має фіксовану структуру кодових комбінацій у відповідності з більшістю протоколів передавання [11]. Вектор повідомлення має довжину n_Σ розрядів, які вміщують n_i розрядів інформаційного повідомлення та n_u розрядів слова управління. Таким чином формуються вектори:

інформаційний $\bar{x}_i : x_{i.1} \ldots x_{i,n_i}\, 0_{u.1} \ldots 0_{u.n_u}$; (7)

управління $\bar{x}_u : 0_{i.1} \ldots 0_{i,n_i}\, x_{u.1} \ldots x_{u.n_u}$; (8)

сумарний $\bar{x}_\Sigma : x_{i.1} \ldots x_{i,n_i}\, x_{u.1} \ldots x_{u.n_u}$. (9)

Вектор управління $\bar{x}_{u.k+1}(g)$ і, відповідно, перехідна матриця управління $\mathbf{\Gamma}(k+1,\ k)$ формуються згідно алгоритмів управління. З урахуванням того, що у системі використовується декілька параметрів управління, формат вектора управління модифікується з використанням двох шаблонів: ідентифікатора параметра регулювання $\bar{x}_{p.j}$ та його значення $\bar{x}_{z.j}$ з кількістю розрядів n_p та n_z відповідно:

$$\bar{x}_u : 0_{i.1} \ldots 0_{i,n_i}\, x_{p.1} \ldots x_{p.n_p}\, x_{z.p1.1} \ldots x_{z.p1.n_z} \ldots x_{z.n_p 1} \ldots x_{z.n_p.n_z} \,. \quad (10)$$

$$\bar{x}_\Sigma : x_{i.1} \ldots x_{i,n_i}\, x_{p.1} \ldots x_{p.n_p}\, x_{z.p1.1} \ldots x_{z.p1.n_z} \ldots x_{z.n_p 1} \ldots x_{z.n_p.n_z} \,. \quad (11)$$

Тоді рівняння (5) можна привести до вигляду

$$\bar{x}_{k+1}(g) = \mathbf{A}(k+1,\ k) \cdot \bar{x}_k(g) \oplus \mathbf{\Gamma}_p(k+1,\ k) \cdot \bar{x}_p(g) \oplus \mathbf{\Gamma}_{z.p1}(k+1,\ k) \times$$
$$\times \bar{x}_{z.p1}(g) \oplus \ldots \oplus \mathbf{\Gamma}_{z.pn}(k+1,\ k) \cdot \bar{x}_{z.pn}(g)\,, \quad (12)$$

де $\mathbf{\Gamma}_p(k+1,\ k)$ – перехідна матриця вектора ідентифікаторів j-того параметра управління; $\mathbf{\Gamma}_{z.pj}(k+1,\ k)$ – перехідна матриця вектора значень j-того параметра управління.

Розподіл імовірностей вектора управління $\bar{x}_u(g)$ необхідно знати в кожний момент часу $k = 0, 1, 2, \ldots$

$$p_{k+1}(\bar{x}_u(g)) = \mathbf{\Pi}_u^T \cdot p_k(\bar{x}_u(g))\,. \quad (13)$$

Структурна схема моделі каналу зв'язку з управлінням подана на рис. 2.

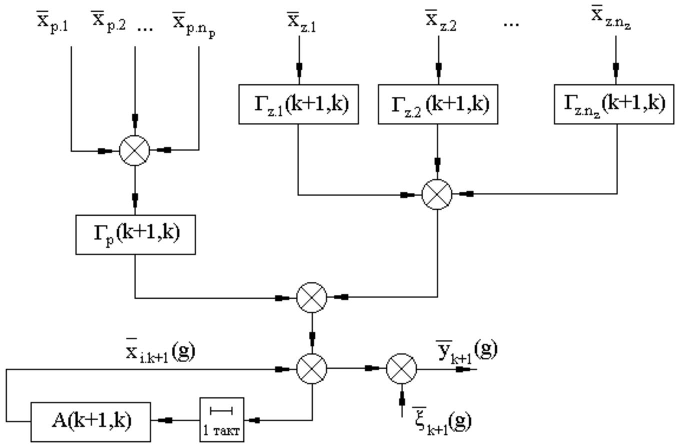


Рис. 2. Структура, яка реалізує модель каналу зв'язку з управлінням

Разом з тим, реальна система передавання інформації працює в напівдуплексному або в дуплексному режимі, що передбачає наявність двох каналів зв'язку – прямого та зворотного, причому приймачі-передавачі здебільшого ієрархічно підпорядковуються один одному (за принципом «головний – другорядний»). При цьому кожен з них буде поміщувати власну інформацію до блока управління. Залежно від особливостей протоколу передавання окремі розряди слова управління можуть не використовуватися, але для подальшого аналізу на даному етапі це враховувати недоцільно. Тоді для прямого (a) і зворотного (b) каналів можна записати системи рівнянь

$$\bar{x}^{a}_{k+1}(g) = \mathbf{A}^{a}(k+1, k)\cdot \bar{x}^{a}_{k}(g) \oplus \mathbf{\Gamma}_{p}^{b}(k+1, k)\cdot \bar{x}^{b}_{p}(g) \oplus \mathbf{\Gamma}^{b}_{z.p1}(k+1, k)\times\times \bar{x}^{b}_{z.p1}(g) \oplus \ldots \oplus \mathbf{\Gamma}^{b}_{z.np}(k+1, k)\cdot \bar{x}^{b}_{z.np}(g) =$$
$$\mathbf{A}^{a}(k+1, k)\cdot \bar{x}^{a}_{k}(g) \oplus$$
$$\oplus\, {}_{u}^{b}(k+1, k)\times \bar{x}^{b}_{u}(g), \qquad (14)$$

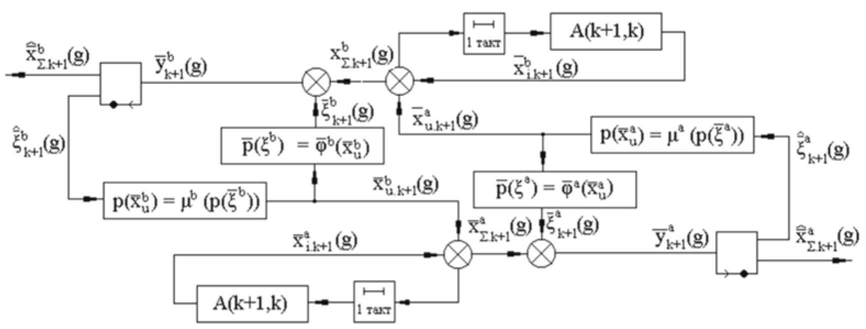
$$\bar{y}^{a}_{k+1}(g) = \bar{x}^{a}_{\Sigma} \oplus \mathbf{B}^{a}(k+1, k)\cdot \bar{\xi}^{a}_{k}(g), \qquad (15)$$

$$\bar{x}^{b}_{k+1}(g) = \mathbf{A}^{b}(k+1, k)\cdot \bar{x}^{b}_{k}(g) \oplus \mathbf{\Gamma}_{p}^{a}(k+1, k)\cdot \bar{x}^{a}_{p}(g) \oplus \mathbf{\Gamma}^{a}_{z.p1}(k+1, k)\times\times \bar{x}^{a}_{z.p1}(g) \oplus \ldots \oplus \mathbf{\Gamma}^{a}_{z.np}(k+1, k)\cdot \bar{x}^{a}_{z.np}(g)$$
$$= \mathbf{A}^{b}(k+1, k)\times$$
$$\times\, \bar{x}^{b}_{k}(g) \oplus \mathbf{\Gamma}_{u}^{a}(k+1, k)\cdot \bar{x}^{a}_{u}(g), \qquad (16)$$

$$\bar{y}^{b}_{k+1}(g) = \bar{x}^{b}_{\Sigma} \oplus \mathbf{B}^{b}(k+1, k)\cdot \bar{\xi}^{b}_{k}(g), \qquad (17)$$

Структура моделі, що описується вказаними рівняннями, наведена на рис. 3.

Рис. 3. Структура, яка реалізує модель системи зв'язку з управлінням для напівдуплексного або дуплексного режиму роботи



Аналіз одержаних результатів. Приймач здійснює ідентифікацію сигналів і формує відгук на вплив управління. У відповідності з цим, встановлюються необхідні вектори управління за активованими параметрами регулювання. Відгук на вектори управління описується функцією $\varphi(x_u)$, яка являє собою залежність розподілу імовірності вектора помилок від вектора управління.

Указана модель не конкретизує параметри управління та їх кількість, але враховує нестаціонарність каналу та помилки, які виникають внаслідок впливу зовнішніх завад.

Незалежно від природи помилок (адитивні, мультиплікативні, граничні), процес їх виникнення в кодових комбінаціях двійкових систем як для біполярного, так і для уніполярного режимів передавання можна описати у вигляді порозрядного додавання за модулем два

$$\bar{y}_n = \bar{x}_\Sigma \oplus \bar{\xi}_n, \qquad (18)$$
$$(y_1 y_2 \ldots y_n) = (x_1 x_2 \ldots x_n) \oplus (\xi_1 \xi_2 \ldots \xi_n). \qquad (19)$$

Розподіл імовірностей для групи векторів можна визначити за допомогою формули Бернуллі для незалежних помилок, що виникають в каналі зв'язку

$$p_{\xi.B}(j) = \sum_{w_j=1}^{n} C_{n_j}^{w_j}\cdot p_0^{w_j}\cdot (1-p_0)^{n_j - w_j}, \qquad (20)$$

де w_j – вага j-тої кодової комбінації; n_j – довжина j-тої кодової комбінації;
p_0 – імовірність помилки в елементарному символі.

Для помилок із синдромом групування імовірність виникнення помилок можна описати формулою, запропонованою Л.П. Пуртовим:

$$p_{\xi.\Pi}(j) = \left(\frac{n_j}{w_j}\right)^{1-\alpha_k} p_0, \qquad (21)$$

де α_k – показник групування помилок для різних типів каналів.

У формулі (21) показник групування помилок α_k можна визначити для конкретного типу каналу лише експериментально. У [12] наведені значення коефіцієнта α_k = (0,32 ... 0,6) для деяких типів каналів. На рис. 4 для порівняння наведені характеристики помилок, розрахованих за вказаними методиками для однакових параметрів передавання. Необхідно відзначити, що байтовий формат передавання даних в асинхронному режимі зменшує вплив синдрому групування.

Залежно від апріорних відомостей щодо умов передавання інформації можна використовувати ту чи іншу методику. Це дозволяє визначити імовірності виникнення помилок для всіх дозволених кодових комбінацій. Імовірність вектора спостереження $\bar{y}(j)$ для цих кодових комбінацій визначається операцією згортання

$$p_k(\bar{y}(j)) = \sum_{i=1}^{2^n} p_k(\bar{x}_\Sigma(i)) \cdot p_k(\xi(i \oplus j)) \tag{22}$$

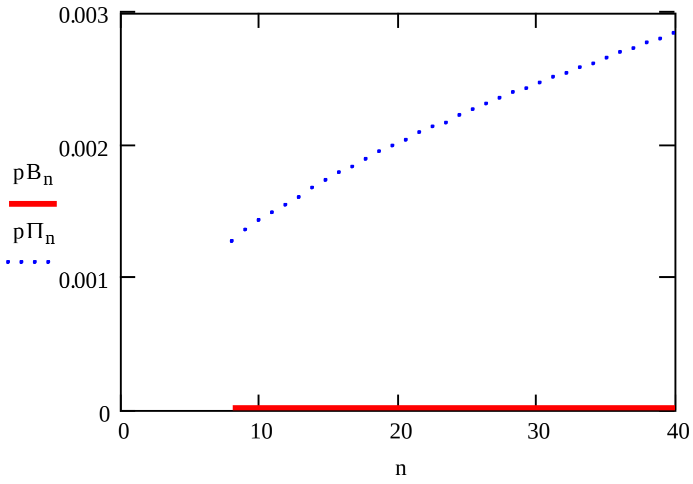


Рис. 4. Розрахунки імовірностей виникнення помилок у кодових комбінаціях для $p_0 = 10^{-3}$ за формулами Бернуллі (*pB*) та Пуртова (*pП*)

Умовна імовірність ідентифікації кодової комбінації $\bar{y}(j)$ за умови передавання кодової комбінації $\bar{x}_\Sigma(i)$ визначається імовірністю появи кодової комбінації $(i_n) \oplus (j_n)$. Тоді умовну імовірність вектора спостереження можна визначити як

$$p(\bar{y}(j)/\bar{x}_\Sigma(i)) = p(\bar{\xi}(i \oplus j)) \ . \tag{23}$$

Повна імовірність появи вектора ідентифікації $\bar{y}(j)$ визначається як згортка розподілів імовірностей кодових комбінацій повідомлення і помилок

$$p(\bar{y}(j)) = p\langle \bar{x}_\Sigma(g), \bar{\xi}(g) \rangle \ , \tag{24}$$

яка визначається виразом (21). Кінцевий вираз для визначення умовної імовірності згідно формули Байєса

$$p(\bar{x}_\Sigma(i)/\bar{y}(j)) = \frac{p(\bar{x}_\Sigma(j)) \cdot p(\bar{\xi}(j \oplus i))}{\sum_{m=1}^{2^n} p(\bar{x}_\Sigma(m)) \cdot p(\bar{\xi}(m \oplus j))} \ , \tag{25}$$

або з урахуванням структури повідомлення

$$\begin{gathered} p\left(\bar{x}_i(j) \oplus \bar{x}_p(i) \oplus \bar{x}_{z.1}(i) \oplus \ldots \oplus \bar{x}_{z.n_p}(i) / \bar{y}(j)\right) = \\ = \frac{p\left(\bar{x}_i(j) \oplus \bar{x}_p(i) \oplus \bar{x}_{z.1}(i) \oplus \ldots \oplus \bar{x}_{z.n_p}(i)\right) \cdot p(\bar{\xi}(j \oplus i))}{\sum_{m=0}^{2^n-1} \left(p\left(\bar{x}_i(j) \oplus \bar{x}_p(i) \oplus \bar{x}_{z.1}(i) \oplus \ldots \oplus \bar{x}_{z.n_p}(i)\right) \cdot p(\bar{\xi}(m \oplus j)) \right)} \ . \end{gathered} \tag{26}$$

Формула (25) може бути використана як для прямого, так і для зворотного каналу, тому ідентифікатор каналу не використовується.

Вектор помилок у каналі зв'язку можна подати у вигляді $\bar{\xi}_{k+1}(g) = (\xi_1 \xi_2 \ldots \xi_n)$, де $\xi_j = 0$, якщо помилки немає, $\xi_j = 1$, якщо помилка наявна. Тоді вага вектора помилок дорівнює сумі його елементів. Показник якості передавання

$$E_k = \frac{1}{\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{n}\xi_j} \quad (27)$$

де K – об'єм вибірки для оцінювання стану каналу зв'язку,

характеризує якість передавання даних каналом зв'язку і може змінюватись у діапазоні]0, 1[. Граничні значення цього інтервалу характеризують потенційні параметри каналу – абсолютно зашумлений канал, де всі біти являють собою помилки ($k \to \infty$) та ідеальний канал без помилок.

Повідомлення, що має передаватися до каналу зв'язку $\bar{x}_k$, складається з інформаційної $\bar{x}_i$ та службової $\bar{x}_u$ частин

$$\bar{x}_k : \bar{x}_i \oplus \bar{x}_u \ . \quad (28)$$

Після виконання завадозахищеного кодування, до кодової комбінації $\bar{x}_k$ додається ще й m контрольних розрядів

$$\bar{x}_n : \bar{x}_k \oplus \bar{x}_m = \bar{x}_i \oplus \bar{x}_u \oplus \bar{x}_m \ . \quad (29)$$

Такий формат представлення даних дозволяє вносити необхідні корективи до вхідних параметрів розробленої моделі каналу.

Висновки. Розроблена математична модель дозволяє використовувати потужний математичний апарат теорії автоматичного управління для аналізу і синтезу систем передавання дискретної інформації. Залучаючи стандартні алгоритми регулювання, можна будувати адаптивні системи, використовуючи для цього цільову функцію показника якості передавання інформації каналом зв'язку E_k, який залежить від складу вектора сигналу $\bar{x}_n$, що передається, імовірності спотворення елементарного сигналу p_0, довжини блока, що передається, N_b та кількості помилок, що виправляються, t. Таким чином, вказану задачу можна сформулювати у вигляді

$$\begin{cases} E_k = \max\limits_{\bar{x}_n, p_0, N_b, t} E_k\left(\bar{x}_n, p_0, N_b, t\right) \\ \upsilon_k \to \upsilon_{nop} \\ p_k \to p_{nop} \end{cases}, \quad (30)$$

де $\upsilon_k = {N_b}/{T} = {\left(8k_\upsilon \cdot N_b\right)}/{\tau}$ – швидкість передавання інформації; p_k – імовірність правильного приймання блоку з N_b байт даних; p_{nop} – порогова імовірність правильного приймання блоку з N_b байт даних; υ_k – швидкість передавання даних каналом зв'язку; υ_{nop} – порогова швидкість передавання даних каналом зв'язку; T – час передавання блоку з N_b байт даних, з урахуванням граничного значення об'єму сигналу $V_k \le V_{nop}$.

Бібліографічні посилання

1. **Калашников А.Е.** Диалоговая система многокритериальной оптимизации технологических процессов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Калашников Александр Евгеньевич. – М., 2004. – 136 с.
2. **Щипин К.С.** Система прогнозирования на основе многокритериального анализа временных рядов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.10 / Щипин Константин Сергеевич. – М.; 2004. – 134 с.
3. Анализ возможности применения теории автоматического управления для исследования телекоммуникационных систем: тр. 2 междунар. форума «Информационные технологии в XX_ веке» [Електронный ресурс] / Батыр С.С., Суков С.Ф. – Днепропетровск, 27 – 28 апреля 2004. – Режим доступу: http://www.masters.donntu.edu.ua/2004/kita/batyr/library/statya1.htm
4. **Абилов А.В.** Разработка и исследование алгоритмов оценки цифровых сигналов и оптимального использования частотного ресурса в радиотелефонной системе: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.16 / Абилов Альберт Винерович. – Ижевск, 2000. – 160 с.
5. **Сысоев С.С.** Рандомизированные алгоритмы стохастической оптимизации и их применение для повышения эффективности работы вычислительных комплексов и сетей: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / Сысоев Сергей Сергеевич. – С.-Пб., 2005. – 80 с.
6. **Елисеев С.Н.** Исследование алгоритмов и устройств цифровой обработки сигналов в системах связи и радиовещания: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Елисеев Сергей Николаевич. – Самара, 2002. – 202 с.
7. **Палей Д.Э.** Исследование динамики дискретных систем фазовой синхронизации второго порядка с нелинейным фильтром: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.01 / Палей Дмитрий Эзрович. – Ярославль, 1998. – 188 с.

8. **Медич Дж.** Статистические оптимальные линейные оценки и управление / Медич Дж.; пер. с англ. – М., 1973. – 440 с.

9. **Квакернак Х.** Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернак, Р. Сиван; пер с англ.. – М., 1977. – 650 с.

10. **Кулик А.Я.** Інформаційна оцінка ефективності адаптивної системи передавання / А.Я. Кулик // Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія. – 2006. – № 3. – С. 41 – 43.

11. Телекоммуникационные технологии [Електронний ресурс] / Ю.А. Семёнов. – Режим доступу: http://book.itep.ru/1/intro1.htm

12. **Кузьмин И.В.** Кодирование и декодирование в информационных системах / И.В. Кузьмин, В.И. Ключко, В.А. Литвин. – К., 1985. – 190 с.

Надійшла до редколегії 13.10.10